©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Über die Resonanz der Luft im freien Raume.

Von Dr. **Stern**,
Privat-Docent an der medicinischen Faeultät.

(Mit 2 Holzschnitten.)

Aus den experimentellen Thatsachen, die in den „Beiträgen zur Theorie des gemeinen Schalles“ mitgetheilt wurden, ergeben sich einige höchst wichtige Schlüsse bezüglich der Gesetze des Schalles überhaupt, Schlüsse, deren Consequenzen nicht bloß theoretischen, sondern auch allgemein praktischen Werth haben.

Aller durch das Zusammenstoßen fester Körper erzeugte Schall läßt sich als aus zwei verschiedenen subjectiven Empfindungen zusammengesetzt constatiren, was allerdings am leichtesten bei Kugeln geschehen kann. Den subjectiven Empfindungen müssen wohl auch objective Vorgänge entsprechen, es müssen also die Schallschwingungen, die beim Zusammenstoß fester Körper entstehen, zwei von einander verschiedene Systeme bilden, und es entsteht nun die Frage, ob diese verschiedenen Wellensysteme schon im festen Körper als solche vorgebildet sind? Es ist immerhin denkbar, daß dies der Fall wäre, daß z. B. bei Kugeln die Oberflächenschichte in anderer Weise schwinge, als die innere Masse, während es kaum annehmbar erscheint, dass die Schwingungsform in der ganzen Masse gleich und derart zusammengesetzt sei, dass sie durch das Gehör in ähnlicher Weise, wie Klänge in Partialtöne, aufgelöst werde in zwei verschiedene Empfindungen; diese Annahme ist, wie gesagt, wegen der principiellen Verschiedenheit beider subjectiven Empfindungen kaum annehmbar. Unter Wasser entfällt der zweite Schalleindruck, und wird durch einen notorisch von der Gefäßwand ausgehenden neuen ersetzt. War dieser zweite Schalleindruck von der Oberflächenschichte der Kugeln gebildet, so müßte man annehmen, daß in dem dichtern Medium diese Schwingungen überhaupt nicht zu Stande kommen können, und daß deßhalb der zweite Schalleindruck wegfällt; war er nur durch die Auflösung einer zu-

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

sammengesetzten Schwingungsform der ganzen Masse entstanden, so mußte die zusammengesetzte Schwingungsform in dem dichtern Medium in eine einfache übergegangen sein, und dies bei Stoffen von der verschiedensten Dichte und Elasticität in gleicher Weise, was jedenfalls höchst auffallend und räthselhaft wäre. In beiden Fällen können nur die verschiedene Dichte und Elasticität des Wassers, nicht aber seine Masse eine solche Umänderung in den Schwingungen des festen Körpers zu Stande bringen, es müßte mithin der Schall schon, wenn die festen Körper $^1/_2$‴ unter Wasser sind, dieselbe Einfachheit aufweisen, wie in größerer Tiefe, nur die Intensität könnte durch die größere Tiefe verändert sein. Dies ist aber in Wirklichkeit nicht der Fall; bis zu einer Tiefe von 1—2″ bleibt der Schalleindruck dem in der Luft mehr weniger ähnlich und wird erst bei größerer Tiefe einfach, ferner wird eine Differenz in der Intensität dieses einfachen Schalles nur bei größeren Differenzen (4—5″) in der Tiefe bemerkbar. Dieser Sachverhalt läßt nun die Annahme, daß die beiden Schallempfindungen entsprechenden Schwingungen bereits im festen Körper vorgebildet seien, mindestens als unwahrscheinlich erscheinen.

Die Resonanz der Luft in begrenzten Hohlräumen erweist sich sowohl beim einfachen klopfenden Schall, als auch beim continuirlichen musikalischen Klang in demselben Sinne auffallend, wie der Schall fester Körper unter Wasser. Wenn man einen beiderseits offenen Cylinder auf eine beliebige Platte, die eine seiner Mündungen luftdicht schließt, stellt und die Platte durch Klopfen schallend macht, so ist die Resonanz der Luft im Cylinder so laut, daß man den ursprünglichen Schall der Platte daneben fast gar nicht hört, wovon man sich leicht überzeugt, wenn man einigemal die Platte allein schallend macht und sich die Qualität ihres Schalles merkt; ähnlich verhält es sich mit allerlei cylindrischen oder auch anders geformten Gefäßen aus starren Stoffen, z. B. Kaffee-, Theekannen etc., wenn man an dem Boden derselben klopft, so entsteht eine sehr laute Resonanz in ihrem Luftraum; in beiden Fällen verschwindet die Resonanz vollständig, wenn die zweite Mündung des Cylinders oder Gefäßes ebenfalls luftdicht geschlossen wird. Dies wäre allerdings gar nicht auffallend, denn es kann die Resonanz der eingeschlossenen Luft im Innern des Gefäßes eben so laut sein, als sie früher bei offenem Gefäß war, und nur durch die starren Wände des Gefäßes zurückgehalten werden von der äußern Luft. Es handelt sich mithin

©Akademie der Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

darum, den Schall im Innern des Gefäßes zu behorchen, wenn dasselbe allenthalben geschlossen ist. Dazu braucht man bloß ein dünnes Kautschukrohr, sei es durch eine Seitenöffnung, wie sie am Abflußrohr der Kaffeekannen sich befindet, sei es durch eine künstlich in dem Deckel des Gefäßes ausgeschnittene kleine Öffnung luftdicht in den Hohlraum und dessen zweites Ende hörrohrartig in den äussern Gehörgang einzuführen. Durch ein solches Hörrohr hört man nun bei offenem Gefäße die Resonanz eben so laut oder noch lauter, als ohne Hörrohr; jedoch insofern verändert, als der Resonanz ein sehr schwacher musikalischer oder Metallklang anhängt, der um so deutlicher hervortritt, je länger der Hohlraum ist. Bei geschlossenem Gefäß aber hört man nur den ursprünglichen klopfenden Schall so wie von außen, und außerdem einen im Vergleich sowohl zur früheren Resonanz, als auch zum ursprünglichen Schall nur sehr schwachen Metallklang, dessen Höhe von der Form und dessen Stärke von der Größe des Luftraumes abhängt, der aber viel deutlicher ist, als jener beim offenen Gefäß; von einer Resonanz ist keine Spur vorhanden.

Ganz dasselbe zeigt sich aber auch, wenn man irgend eines der genannten Gefäße als Resonator für musikalische Klänge, etwa für Singtöne benützt. Gebraucht man ein Hörrohr in ähnlicher Weise wie früher, so kann man den Eigenton des Hohlraumes leicht finden, da er, wenn man mehrere Töne der Scala in denselben hineinsingt, am lautesten in's Ohr schmettert durch das Hörrohr. Hat man den entsprechenden Ton gefunden, so kann man ihn auch durch ein zweites weiteres Kautschukrohr in den Luftraum hineinleiten, die Resonanz ist ganz dieselbe wie früher. Setzt man aber einen Deckel auf das Gefäß, durch welchen beide Kautschukröhren luftdicht durchgehen, und leitet denselben Ton wieder durch das Rohr, so ist von einer Resonanz keine Spur mehr vorhanden. Die Stimme bleibt wohl wesentlich stärker, als sie von außen gehört wird, aber nicht so wie bei offenem Gefäß: die Verstärkung kömmt allen Tönen fast gleichmäßig zu, wie wenn die Stimme direct aus dem Rohr in den äußern Gehörgang geleitet wird. Es ist nun die Frage, warum die Resonanz, so wie der Luftraum, von der äußern Luft ganz abgesperrt ist, sich so auffallend verändert? Es wird gegenwärtig bekanntlich die Neubildung des Resonanzschalles ausschließlich in den begrenzten Luftraum hineinverlegt; dieser Annahme zufolge müßte der Schall im

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Innern vollständig geschlossener Gefäße von gleicher Qualität und eher lauter sein, als bei theilweise offenen, und es müßten bloß Höhendifferenzen zwischen beiden bestehen. Da dies nun aber nicht der Fall ist, so ist wohl abermals die Annahme, daß die dem Resonanzschall zu Grunde liegenden Schallschwingungen bloß von dem begrenzten Luftraume neugebildet werden, in hohem Grade zweifelhaft.

Wenn nun aber der Schall, der von festen Körpern auszugehen scheint, wahrscheinlicherweise nicht in diesen allein gebildet wird, wenn die Resonanz in begrenzten Lufträumen auch nicht in diesen allein zu Stande kommen soll, dann kann es wohl nur die mit beiden genannten Schallquellen in Contact stehende freie Luft sein, die sich an dem Gesammtschall in wesentlichem Grade betheiligt. Beide Erscheinungsreihen stehen dann einander vollkommen parallel; bei festen Körpern ist nur das erste schwache, nur unter besonders günstigen Umständen hörbare Schallmoment dem festen Körper selbst angehörig, und dieses Schallmoment regt in der umgebenden Luft den viel lautern zweiten Schall an und fällt naturgemäß unter Wasser weg, so wie dessen Schichte zu groß wird, um die ursprünglichen Schwingungen noch in hinreichender Stärke an die Luft zu übertragen. Bei begrenzten Lufträumen ist der ihnen eigene Schall ebenfalls nur sehr schwach, durch ein Hörrohr aus dem Innern vernehmbar und dies auch nur, wenn der ursprüngliche Schall ein klopfender, also sehr kurz ist; bei einem Sington hingegen auch durch ein Hörrohr nicht erkennbar; dieser schwache neugebildete Schall regt aber durch Übertragung auf die äußere Luft in dieser einen lauten neuen Schall an, der seinerseits selbstverständlich sich nach allen Richtungen, also auch in den Hohlraum hinein, fortpflanzt, mithin auf dessen ursprünglichen Schall in bestimmter Weise zurückwirkt.

Der Satz, daß Schallschwingungen irgend eines Körpers, wenn sie auf die Luft im umbegränzten Raume übertragen werden, in dieser ein ganz neues System von Schall gebenden Schwingungen anregen, ergibt sich aus den angeführten Erscheinungen mit einem gewissen Grade von Wahrscheinlichkeit. Das Verhalten des Schalles fester Körper in der Luft in der Nähe von reflectirenden Oberflächen ist nun aber ein Moment, welches die Wahrscheinlichkeit des angeführten Satzes bis zu jenem Grade steigert, der der Mehrzahl allgemein acceptirter physikalischer Sätze überhaupt zukömmt. Es ändert sich nämlich der Schall von beliebigen Platten bei ihrer Annäherung

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

an die reflectirende Wand unter sonst unveränderten Bedingungen in so auffälliger Weise, daß seine Abhängigkeit von der zwischen Platte und Wand befindlichen Luft außer allen Zweifel gestellt erscheint. Der Schall wird bei einer bestimmten Entfernung der Platte von der Wand am tiefsten und intensivsten, bei der Annäherung um so schwächer und höher, je näher beide einander, bei der Entfernung ohne Rücksicht auf den Grad derselben etwas schwächer und höher; zu bemerken ist, daß bei allen Höhen- und Intensitätsveränderungen die Farbe des Schalles immer gleich bleibt. Es trifft diese Veränderung aber bloß den sogenannten zweiten Schall, während die gleichzeitig hörbaren Klänge ganz unverändert bleiben, was am leichtesten bei Stein- und Metallplatten, übrigens bei einiger Aufmerksamkeit auch bei Holzplatten zu erkennen ist. Es könnte diese Erscheinung auf den ersten Blick als ein Interferenzphänomen betrachtet werden, als würde sich der reflectirte Schall mit dem ursprünglichen interferiren. Bei genauerer Erwägung kann aber diese Annahme nicht aufrecht erhalten bleiben, und zwar einerseits aus dem ganz wichtigen Grunde, weil dabei die Klänge sich in gleicher Weise ändern müßten, was notorisch nicht geschieht, andererseits aber, weil jede Interferenz von der Phasendifferenz der zusammentreffenden Wellen abhängt, mithin bei ganz langsamem Annähern der Platte an die Wand der Schall abwechselnd stärker und schwächer, tiefer und höher werden müßte, was abermals notorisch nicht der Fall ist, da der Schall ganz gleichmäßig der Entfernung, d. i. der Länge der Luftsäule zwischen den zwei Ebenen proportional schwächer und höher wird. Eben so wenig läßt sich die Annahme aufrecht halten, daß die Reflexion von einer Fläche schon hinreiche, um die Luft in ähnlicher Weise wie das bei Pfeifen geschieht, schallend zu machen, weil ja die Schallfarbe ganz dieselbe bleibt, als wenn gar keine Reflexion vorhanden ist. Das Phänomen ist aber höchst natürlich, wenn der zweite Schall nur in der Luft gebildet wird, dann muß seine Höhe und Stärke offenbar auch von der Länge der Säule abhängen; dann ist es begreiflich, daß in einer bestimmten Entfernung der reflectirenden Wand der Schall durch die Reflexion tiefer wird, und daß eben durch die Wirkung der Reflexion der Schall auch bei der kleinsten Entfernung der beiden Ebenen von einander noch nicht so hoch ist, als man der Kürze der Luftsäule entsprechend vermuthen könnte. Diese Erscheinung widerlegt zugleich auch die etwaige Vermuthung,

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

als würde der zweite Schall fester Körper im freien Raume durch Reflexion vielleicht von der Bodenfläche, mithin als eine Art Nachhall zu Stande kommen.

Da nun das angeführte Phänomen durchaus nicht subtil, sondern so greifbar deutlich, einfach und leicht controlirbar ist, wie nur irgend ein allgemein bekanntes Phänomen, da das Phänomen bei der sorgfältigsten Erwägung auf gar keinen andern Grund bezogen werden kann, als auf den oben angedeuteten, so läßt sich wohl die Giltigkeit des oben aufgestellten Satzes kaum durch irgend einen berechtigten Einwand anfechten, und zwar um so weniger, je größer die Zahl anderer Erscheinungen ist, die noch auf denselben hindeutet, und je mehr er mit allen bekannten physikalischen Gesetzen selbst auf deductivem Wege in Einklang gebracht werden kann. Diesem Satze zufolge ist nun der weitaus lautere und gewöhnlich allein percipirte zweite Schall fester Körper, eben so wie der laute Resonanzschall von allerlei begrenzten Lufträumen, der diese umgebenden Luft angehörig, mithin als Resonanz des unbegrenzten Luftraumes aufzufassen.

Die Bedingungen des Resonanzschalles der unbegrenzten Luft ergeben sich aus einer weitern Reihe von Thatsachen, die in der früher erwähnten Abhandlung mitgetheilt sind. Was feste Körper anbelangt, so geben weiche Stoffe, Blei, Kork, Kautschukkugeln, nur Spuren von Luftresonanz, Holz einen tiefern lautern Resonanzschall als Metall, und Stein. Platten geben bei transversalem Stoß einen viel lautern tiefern Resonanzschall, hingegen einen schwächern ersten Schall als bei longitudinalem; Holzplatten überdies einen lautern tiefern als Stein- und Metallplatten, dünnere einen lautern als dickere, während letztere einen lautern ersten Schall hören lassen, größere ebenfalls einen lautern tiefern Resonanzschall als kleinere. Der Unterschied in der Schallstärke bei longitudinalem und transversalem Stoß ist bei Stein- und Metallplatten viel geringer als bei Holz. Bei Stäben ist der zweite Schall im Verhältniß zum ersten ganz besonders beim longitudinalen Stoß sehr schwach, bei transversalem Stoß in geringerem Grade aber doch schwächer als bei Platten, außerdem bei dünnern Stäben höher als bei dickern, der erste Schall wieder bei longitudinalem Stoß weitaus lauter als bei transversalem. Bei gleichem Kubikinhalt geben Stäbe und Platten einen fast gleich lauten ersten Schall, während

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

der zweite Schall der Platte jenen des Stabes an Stärke und Tiefe um so mehr überwiegt, je größer ihre Fläche, d. i. je dünner sie ist. Ob man es in allen diesen Fällen mit der Luftresonanz zu thun habe, erkennt man, wenn die betreffenden Körper unter Wasser oder auch wenn sie in unmittelbarer Nähe von reflectirenden Wänden schallend gemacht werden; unter Wasser fällt überall der zweite Schall weg oder geht in den der Gefäßwand über, was man durch Annäherung oder Entfernung von der Gefäßwand oder durch Benützung von Gefäßen aus verschiedenen Stoffen bei gleicher Größe deutlich erkennt, — der erste hingegen wird allenthalben lauter; in unmittelbarer Nähe von reflectirenden Wänden erleidet der laute Resonanzschall von Platten die bereits angegebene Veränderung, während der schwächere bei longitudinalem Stoß statt höher merklich tiefer wird. Es entsteht nun die Frage, warum der transversale Stoß, der kleinere Elasticitätscoëficient, wie er dem Holze gegenüber von Stein und Metall zukommt, die Größe der Plattenhauptfläche den Resonanzschall lauter und tiefer, die Dicke der Platte hingegen ihn schwächer und höher macht, und was denn in all den angeführten Fällen das bestimmende Moment sei? Da läßt sich nun zunächst hervorheben, daß Stärke und Höhe des dem festen Körper eigenen Schalles für die Stärke und Höhe der Luftresonanz nicht allein maßgebend seien, es haben Metall und Stein einen lautern Eigenschall als Holz, wovon sich Jedermann ziemlich leicht überzeugen kann; der Eigenschall von Platten ist wesentlich lauter bei longitudinalem Stoß als bei transversalem, lauter bei dicken, als bei dünnen Platten; der Eigenschall von Stäben ist nicht in gar hohem Grade verschieden von dem gleich langer und dicker Platten, während der Resonanzschall der Luft gerade da schwächer wird, wo der Eigenschall lauter ist; bei Metall und Stein sowohl in Kugel- als auch in Platten- und Stabform, schwächer als bei Holz, bei longitudinalem Stoß schwächer als bei transversalem, im letzterem Falle bei dicken Platten schwächer als bei dünnen, hingegen bei Stäben der Resonanzschall viel weiter absteht bezüglich seiner Stärke von dem der Platten, als der Eigenschall. Ähnlich verhält es sich auch mit der Höhe, wenn diese auch viel schwieriger zu beurtheilen ist, so z. B. ist der Eigenschall von Stäben von ihrer Länge, der Resonanzschall hingegen von ihrer Dicke abhängig. Wenn nun der Resonanzschall bezüglich seiner Höhe und Intensität nicht von dem Eigenschall der

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

festen Körper allein abhängt, mithin für beide verschiedene Bedingungen bestehen, wenn aber trotzdem auch der Resonanzschall als schwingende Bewegung doch nur durch Bewegungen erzeugt sein kann, so drängt sich hier schon der Schluß mit einiger Wahrscheinlichkeit auf, daß bei schallenden festen Körpern neben jenen Schwingungselementen, die ihrem Eigenschalle zu Grunde liegen, auch solche bestehen können, die den Eigenschall entweder gar nicht oder nur in sehr geringem Maße constituiren, d. h. die den Gehörnerven unmittelbar gar nicht, oder nur wenig afficiren, die aber, auf die Luft übertragen, diese viel intensiver schallend machen, als die Schwingungselemente des Eigenschalles. Faßt man die Verschiedenheit der Bewegungsformen in all den angeführten Fällen in's Auge, so muß zunächst als Unterschied der Schwingung einer Platte bei gleich starkem longitudinalem und transversalem Stoße auffallen, daß in ersterem Falle nur longitudinale Schwingungen mit kleinen und zwar um so kleineren Amplituden, je dichter und härter der Stoff ist, bestehen können, während in letzterem Falle longitudinale Schwingungen nur bei dicken Platten in untergeordneter Weise, hauptsächlich aber transversale bestehen müssen mit wesentlich größern Amplituden, als die der longitudinalen ist, und zwar um so größern, je dünner und größer die Platte und je weicher der Stoff ist. Die Stärke des Resonanzschalles scheint somit in diesem Falle der Amplitude der ursprünglichen Schwingungen proportional zu sein.

Ein zweiter Unterschied der Bewegungsformen stellt sich zwischen Platten und Stäben heraus, da nämlich der Resonanzschall bezüglich seiner Stärke und Tiefe, der Größe der freien Fläche, während der Eigenschall eher dem Kubikinhalt des festen Körpers proportional ist, so hängt ersterer offenbar von der Anzahl der Berührungspunkte zwischen Luft und festem Körper ab.

Endlich ergibt sich noch ein dritter Unterschied in den Bewegungsformen aus der Verschiedenheit des Elasticitätscoëfficienten der weichen Stoffe, Kautschuk, Kork, Blei, gegenüber von Holz, Stein und Metall. Die Weichheit der Stoffe, die in einer leichten Verschiebbarkeit ihrer Molecüle im Innern besteht, bedingt offenbar, wenn dieselben in Schwingungen gerathen, eine längere Dauer der Einzelschwingungen bei gleicher Amplitude; da nun der Resonanzschall von einer bestimmten Grenze der Weichheit der Stoffe um so schwächer wird, je weicher sie sind, also je kleiner ihre Bewegungs-

©Akademie der Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

geschwindigkeit, so ist eine bestimmte Geschwindigkeit der Schwingungen bei gegebener Amplitude ebenfalls eine der Bedingungen, von denen die Stärke der Resonanz abhängt. Faßt man das Resultat aus allen angeführten Erscheinungen zusammen, so ist die Stärke und Höhe des Resonanzschalles von der Amplitude und Dauer der ursprünglichen Schwingungen und der Anzahl der Berührungspunkte zwischen dem primär schallenden Körper und der Luft abhängig, und zwar ist die Stärke zur Schwingungsamplitude und Berührungsoberfläche in geradem, zur Schwingungsdauer in umgekehrtem Verhältniß, während die Höhe sich umgekehrt verhält, d. h. je kürzer die Schwingungsdauer, um so höher, je größer die Berührungsfläche, um so tiefer der Resonanzschall.

Was die durch den Schall begrenzter Lufträume angeregte Resonanz anbelangt, so ergeben sich ihre Bedingungen aus einer Reihe von Resonanzphänomenen, die theils durch klopfenden, theils durch continuirlichen Schall zu Stande kommen.

Die durch klopfenden Schall erzeugten Resonanzphänomene sind aber hier viel instructiver, weil der primäre Schall nur kurz und schwach ist, die Intensität seiner aufeinander folgenden Schwingungen so rasch abnimmt, daß man es gewissermaßen nur mit der ersten als einem einfachen Impuls zu thun hat, welchen die angeregte Resonanz überdauert, so daß Stärke und Höhe dieser Resonanz allein leichter beurtheilt werden kann, als beim continuirlichen Schall, bei dem die Resonanz anregenden Schwingungen eben so stark sind und eben so lange dauern, als die Resonanz selbst, so daß nur die Resultirende beider zur Wahrnehmung gelangt. Hat man irgend ein starrwandiges Gefäß von nahezu regelmäßiger sphäroidischer, ellipsoidischer etc. Form und beliebiger Öffnung, etwa eine Kanne, Krug, Lampenkugel etc. und erzeugt an ihrer Mündung durch Zusammenstoßen von Kugeln einen Schall, so hört man statt des gewöhnlichen zweiten Schalles einen ganz neuen. Dieser neue Schall ist nun, selbst wenn Kork- oder Kautschukkugeln gebraucht werden, nahezu so laut als bei Holzkugeln, hingegen bei Stein- und Metallkugeln wesentlich schwächer und kürzer; wenn Stein oder Metall mit Holz, Kork oder Kautschuk combinirt wird, so ist der neue Schall laut, wenn der weichere Stoff dem Hohlraum näher ist, hingegen sehr schwach, wenn der harte in der Nähe des Hohlraumes sich befindet. Der neue Schall ist überhaupt nur hörbar,

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

wenn die Kugeln in der Richtung der Längsaxe des Gefäßes an einander stoßen, ist kaum merklich, wenn sie der Queraxe parallel gegen einander sich bewegen. Nimmt man statt einer zweizölligen Kugel einen Stab von $^3/_4$″ Dicke, taucht ihn zum Theile in das Gefäß und stößt ihn longitudinal, so ist der neue Schall nur bei kurzen (6″) Stäben hörbar, um so lauter, je dicker der Stab, bei langen über 12″ nicht; stößt man den Stab transversal, so fehlt der neue Schall ganz. Wird das Gefäß in bedeutendem Maße größer, so schwindet der neue Schall in dem Grade, als die Größe zunimmt, bei Stäben früher als bei Kugeln und erscheint wieder, wenn auch die ursprünglich schallenden Körper im selben Maße größer werden. Die Höhe des neuen Schalles hängt in erster Linie von der Mündung des Gefäßes und seinem Volum ab, je kleiner die Mündung und je größer das Gefäß um so tiefer der Schall. Die Stärke desselben bleibt nur bis zu einer gewissen Grenze der Verengerung, proportional der Tiefe, bei noch weiter gehender Verengerung wird der Schall wohl noch tiefer, aber entschieden schwächer; außerdem wird aber noch der Schall um so höher, je weiter die festen Körper von der Mündung entfernt werden, und zwar nicht bloß deßhalb, als würde die Mündung durch die festen Körper zum Theile gedeckt; denn wenn man einen Stab oder eine schmale Platte longitudinal in ein Gefäß, welches außer dem regelmäßigen Hohlraum noch eine Art Hals hat, senkt, so ist der Schall je nach der Form des Gefäßes am tiefsten bei jener Länge des versenkten Stückes, die der Länge des Halses entspricht, und wird höher, so wie man das versenkte Stück zu heben beginnt, noch bevor das Ende im Querschnitt der Öffnung sich befindet. Ebenso wird der Schall höher bei dünnen Stäben als bei dicken, höher bei längern als bei kürzern von gleicher Dicke.

Will man aus all diesen Thatsachen die Bedingungen des Resonanzschalles erkennen, so muß man sich vergegenwärtigen, daß hier der Resonanzschall durch jene Schwingungen angeregt wird, welche die Luft im Innern des Hohlraumes ausführt; diese Schwingungen entstehen ihrerseits wieder aus denen des festen Körpers an der Mündung, und zwar in der Weise, daß die von dem letztern ausgehenden Wellen allseitig reflectirt werden, und nun ihre bewegende Kraft auf die in der Axe des Gefäßes befindlichen Massentheilchen von allen Seiten her übertragen. Die bewegende Kraft, die diese Massentheil-

©Akademie der Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

chen trifft, muß mithin offenbar viel größer sein als jene, die sie ohne Reflexion getroffen hätte, die größere Kraft hat stärkere Verdichtung, und diese größern Amplituden und Geschwindigkeiten in den Excursionen der Massentheilchen nach jener Richtung, von der her kein Druck besteht, zur Folge. Es können mithin auch solche Schwingungen, die in freier Luft keine Resonanz erregen, wie z. B. die des Kautschuks, derart verstärkt werden, daß sie nun allerdings im Stande sind, auch in der freien Luft Resonanz zu erregen. Es ist klar, daß diese Schwingungen in der auf die Öffnung senkrechten Axe des Gefäßes caeteris paribus um so größere Amplituden haben werden, je größere Amplituden die vom festen Körper ausgehenden Schwingungen nach der Reflexion hatten, d. i. je weicher der in der Nähe des Hohlraumes befindliche elastische Körper ist, je näher derselbe der Gefäßmündung, je mehr die Hauptrichtung der primären Schwingungen der Gefäßaxe parallel werden und je günstiger das Verhältniß des Luftvolums zur bewegenden Kraft; sie werden ferner um so größere Amplituden haben, je größer die reflectirende Oberfläche im Verhältnisse zum Gesammtvolum des Luftraumes, d. i. je enger die Öffnung der Mündung ist, und je größer die Oberfläche, von der die primären Schwingungen ausgehen. Die Dauer der Einzelschwingung in der Gefäßaxe muß bei gleicher Amplitude der primären Schwingungen offenbar um so kleiner sein, je kleiner der Hohlraum ist, da die Verdichtungen und Verdünnungen in der Gefäßaxe, die durch jede einzelne von den Seitenwänden reflectirte Schwingung erzeugt werden, um so schneller aufeinander folgen müssen, je kürzer der Weg von den Wänden zur Axe und vom Gefäßboden zur Öffnung; bei gleichem Hohlraume ist die Schwingungsdauer in der Gefäßaxe um so kleiner, je kleiner die Amplitude der primären Schwingung im Verhältniß zur Größe des Raumes, aber nur von jener Grenze an, bei der die primäre Schwingung nach ihrem ersten Impuls auf die Luft im Hohlraume bereits für diese als erloschen zu betrachten ist; deßhalb die Resonanz höher, wenn der primär schallende Körper von der Gefäßmündung entfernt wird, oder wenn durch Erweiterung der Gefäßmündung die reflectirende Oberfläche und mit dieser der Druck auf die Theilchen in der Gefäßaxe verkleinert wird. Die Größe der Berührungsfläche zwischen äußerer und innerer Luft hängt selbstverständlich von der Mündung ab. Der Resonanzschall der äußern Luft ist nun um

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

so stärker und tiefer, je größer die Amplitude der ursprünglichen Schwingungen bei gleicher Schwingungsdauer, mithin bei gleich großen Gefäßen um so tiefer und stärker, je näher der feste Körper der Mündung, je weicher derselbe ist; bei ungleich großen Gefäßen ist die Luftresonanz bis zu einer gewissen Grenze um so stärker, je größer das Gefäß, jenseits dieser Grenze um so stärker, je größer die dem Hohlraume zugekehrte Fläche des schallenden Körpers. Hingegen hat die Größe der Mündung einen doppelten und zwar entgegengesetzten Einfluß auf den Resonanzschall, indem mit der Verengung der Öffnung bis zu einer gewissen Grenze der Resonanzschall stärker und tiefer, jenseits dieser Grenze aber schwächer und tiefer wird. Es lehrt mithin die Erfahrung durch die angeführten Thatsachen, daß die durch Hohlräume angeregte Resonanz der äußern Luft, wenigstens beim klopfenden Schall, ähnlichen Gesetzen entspricht, wie die durch feste Körper angeregte. Der Unterschied zwischen beiden besteht hauptsächlich erstens darin, daß die Amplitude der ursprünglichen Schwingung fester Körper die Höhe der Luftresonanz nicht nachweisbar, während sie die Höhe der Resonanz in Hohlräumen nachweisbar beeinflußt, da bei größerer Entfernung des festen Körpers vom Hohlraume so wie bei Vergrößerung seiner Mündung eben nur die Amplitude der in der Axe des Hohlraumes bestehenden Schwingungen verkleinert werden kann. Ein zweiter Unterschied zeigt sich in dem Einflusse der Berührungsoberfläche zwischen Luftraum und äußerer Luft, da dieser den Reflexschall um so tiefer werden läßt, je kleiner er ist, was bei festen Körpern umgekehrt ist. Auch dieser Unterschied läßt sich darauf zurückführen, daß die Berührungsoberfläche zwischen den beiden Medien im Allgemeinen auf die Höhe des Schalles weniger Einfluß hat, als die reflectirende Oberfläche; da mit der Verkleinerung der erstern die letztere gleichmäßig vergrößert wird, so überwiegt das Tieferwerden des Schalles. Es ergibt sich aber auch noch aus den angeführten Thatsachen, daß die Resonanz sich wesentlich verschieden verhält in der freien Luft und in begrenzten Lufträumen. Erstere ist in erster Linie von den primären Schwingungen und nur in zweiter Linie von der etwaigen Begrenzung der Luft abhängig, letztere hingegen, die erst durch Reflexion zu Stande kömmt, ist in erster Linie von der Form und Größe des Hohlraumes und erst in zweiter von den ursprünglichen Schwingungen abhängig.

©Akademie der Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Wirkt aber ein continuirlicher Schall statt des klopfenden auf irgend einen Hohlraum, dann ist wegen der Aufeinanderfolge einer größern Reihe von gleich starken Bewegungsimpulsen von außen her die Stärke der im Innern sich bildenden selbstständigen Schwingungen allerdings auch davon abhängig, ob die Dauer derselben mit der Dauer der äußern Impulse derart congruirt, daß sie sich gegenseitig nicht hemmen, was bekanntlich nur dann geschieht, wenn der anregende Schall gleiche oder ähnliche Höhe hat wie der Eigenschall des Gefäßes, während in jedem andern Falle die selbstständigen inneren Schwingungen je nach der Phasendifferenz zwischen ihnen und dem anregenden mehr oder weniger geschwächt, oder auch ganz aufgehoben werden, so daß in letzterem Falle die Hohlraumresonanz nur dieselbe ist wie die in freier Luft, während bei nicht ganz vollständiger Vernichtung der Resonanz der ursprüngliche Schall durch dieselbe etwas verstärkt wird und die Resultirende beider die Höhe des stärkern Bestandtheiles zeigt, was übrigens sowohl mit den Erscheinungen, die durch Berührung von schwingenden Stimmgabeln mit Platten von verschiedenen Stoffen und Dimensionen entstehen, als auch mit den theoretischen Deductionen Helmholz's (Crelle's Journal Bd. 57) übereinstimmt.

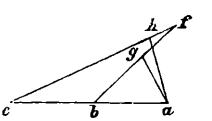
Alle in begränzten Lufträumen auf welche Art immer angeregten Klänge müssen dem bisherigen zufolge ebenfalls aus den genannten beiden Schallarten, deren einer im Innern der Hohlräume, deren zweiter außen als einfache Luftresonanz zu Stande kömmt, zusammengesetzt sein, nur daß hier der Resonanzschall auf den primären derart zurückwirkt, daß beide von gleicher Qualität sein müssen. Daß in der That alle bei den Zungen- und Labialpfeifen angeregten Klänge solche zusammengesetzte Schallphänomene seien und denselben Gesetzen unterliegen, zeigt die Betrachtung aller bezüglichen musikalischen Instrumente, bei denen Größe, Lage der Anblaseöffnung, Stärke der anregenden Impulse, Geräusche etc. ganz denselben Einfluß haben auf die Klänge, wie bei dem Resonanzschall der Hohlräume, und dürfte wohl die Ursache der so mangelhaften Übereinstimmung des mathematischen Calculs mit den experimentellen Thatsachen bei allen Pfeifen darin zu suchen sein, daß die active Theilnahme der äußern Luft an der Schallbildung gar nicht berücksichtigt wurde; eine Vermuthung, die um so wahrscheinlicher wird, als die Divergenz zwischen Theorie und

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Experiment um so größer wird, je größer die Communicationsfläche zwischen innerer und äußerer Luft, bei offenen und weitern Pfeifen größer als bei gedeckten und engern. In ähnlicher Weise erklärt sich wohl auch ungezwungen die längst bekannte Thatsache, daß die Töne von Orgelpfeifen um so tiefer werden, ein je größerer Theil ihrer starren Wände durch dünne biegsame, nämlich Pergament, ersetzt wird und je feuchter das Pergament ist; es können nämlich solchen biegsamen dünnen Wänden die Schwingungen der eingeschlossenen Luft sich um so leichter mittheilen, je feuchter und dünner sie sind, welche mitgetheilten Schwingungen, wenn sie auch an und für sich nicht als Schall precipirt werden könnten, doch in der freien Luft einen um so tiefern Resonanzschall anregen, je größer das bezügliche Wandstück und je feuchter dasselbe ist.

Daß sich in der freien Luft aus einer übertragenen Schwingung ein ganzes System neuer mit erstern nicht immer isochroner bilden müsse, läßt sich aber auch durch eine bildliche Analyse der Bewegungsvorgänge aller betheiligten Massentheilchen veranschaulichen. Denkt man sich irgend einen festen Körper, z. B. eine Platte, in der Luft transversal schwingen, und vergleicht die in der Luft angeregten Schwingungen mit den anregenden, so fällt zunächst auf, daß die Abnahme der Anfangsgeschwindigkeit der schwingenden Theilchen in der Luft eine ganz andere ist, als im festen Körper. Ist z. B. *abc* etc. (Fig. 1) eine Punktreihe einer festen, dichten, transversal schwingenden Masse, ist *a* in Bewegung und *b* sein Nachbartheilchen, gelangt *a* in einer bestimmten Zeit bis *f*, so hat es sich von *b* um das Stück *fg* entfernt, wenn $ab = bg$, und ist *a* um den Winkel *abf* gegen *b* verschoben; wäre aber *c* das nächste Theilchen zu *a*, so wäre bei derselben Bewegung die absolute Entfernung ($ac = hc$) *fh* bedeutend kleiner, eben so der Verschiebungswinkel *acf*. Die elastische Kraft, die zwischen *a* und *b* oder *a* und *c* bei transversaler Bewegung entsteht, ist aber nicht der absoluten Entfernung beider von einander, sondern der relativen, d. i. dem Verhältniß ihrer Entfernung in der Ruhelage zur absoluten, also im angeführten Beispiel dem Bruch $\frac{fg}{ab}$ oder $\frac{fh}{ac}$ proportional.

Fig. 1.



©Akademie der Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Es muß also die durch eine Bewegung von bestimmter Dauer wach gerufene elastische Kraft bei dichteren Medien, bei gleichem Elasticitätscoëfficienten und gleicher Bewegungsgeschwindigkeit größer sein, als bei dünneren. Die Verzögerung, die die Bewegung des a wenigstens in der ersten Zeit erleidet, ist mithin bei dichteren Medien caeteris paribus größer, als bei dünneren. Trifft nun der Stoß des bewegten festen Theilchens ein Lufttheilchen, so wird diesem die Anfangsgeschwindigkeit des festen Körpers mitgetheilt, es beginnt also seine Bewegung mit dieser Anfangsgeschwindigkeit. Da diese Geschwindigkeit in der weitaus dünneren Luftmasse nicht so schnell vermindert wird, als im festen Körper, so muß sich offenbar das Lufttheilchen von dem festen immer weiter entfernen, mithin zwischen beiden, selbst wenn ihre Excursion gleiche Dauer hätte, doch eine Verdünnung oder leerer Raum zu Stande kommen, in die die seitlichen Lufttheilchen hineingedrängt werden müssen. Ist aber die Excursion des Lufttheilchens auch noch von längerer Dauer, als die des festen Körpers, so werden während der ersteren die letzteren sich mehrmals wiederholen. Um nun die Wirkung des momentanen Impulses auf die Luft zu beurtheilen, muß berücksichtigt werden, daß die Molecule derselben in der Gleichgewichtslage innerhalb einer geringen Höhe nothwendigerweise in ganz gleicher Entfernung von einander sein müssen. Denkt man sich diese Molecule als einfache Punkte, so müssen um jeden Punkt herum in jeder Fläche des Raumes kleinere und größere Sechsecke gebildet werden von den angrenzenden Theilchen, und es würden sich die verschiedenen Flächen nur durch den größeren und kleineren Abstand der Punkte von einander unterscheiden. Wird nun irgend ein Punkt durch einen momentanen Impuls in Bewegung gesetzt, so kann die Richtung dieser Bewegung im Allgemeinen durch einen Punkt des kleinsten Sechseckes, oder irgendwo zwischen zwei solchen Punkten durchgehen. Faßt man die Einwirkung eines jeden Punktes bloß auf jene zunächst liegenden, die in einer beliebigen durch die Bewegungsrichtung zu legenden Fläche sich befinden, in's Auge, theilt die Zeit in solche Einheiten, welche die Dauer der Fortpflanzung jedes Impulses zu den nächstgelegenen Punkten ausdrücken, und construirt die Verschiebungen aller Punkte während einer Reihe solcher Zeiteinheiten in einer Fläche, so lassen sich folgende Sätze für die allgemeine Form der Bewegungen constatiren:

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Die Verschiebungen aller dem erst bewegten Punkt zunächst liegenden sind sowohl ihrer Richtung, als auch ihrer Größe, Dauer und Zusammensetzung nach höchst verschieden.

Der erst bewegte Punkt muß sich einigen der nächstliegenden nähern, von anderen sich entfernen. Die Annäherung ist am größten an die in die Bewegungsrichtung fallenden, an die seitlich von dieser Richtung gelegenen ist sie um so geringer, einen je größeren Winkel ihre Verbindungslinie mit dem erst bewegten Punkt mit der Bewegungsrichtung einschließt. Der Annäherung entspricht auch die Geschwindigkeit, mit der die Verschiebung vor sich geht, während die Richtung der Verschiebung eines jeden Punktes in die Richtung der Verbindungslinie der beiden Punkte fällt. Die von der Bewegungsrichtung seitlich gelegenen Punkte müssen sonach nach außen verschoben werden, aber nur so lange, bis der erst bewegte seine größte Annäherung an dieselben erreicht hat; bewegt er sich auch nachher noch in der ursprünglichen Richtung weiter, so muß er sich von ihnen wieder entfernen, es müssen die seitlich gelegenen Punkte umkehren, und einwärts gegen die Bewegungsrichtung des ersteren rücken, wobei die an entgegengesetzten Seiten liegenden gegen einander stoßen müssen. Die seitlich gelegenen Punkte müssen sonach, wenn die Excursion des ersten Punktes eine gewisse Dauer hat, in transversale Schwingungen gerathen, deren Dauer nur in zweiter Linie abhängig ist von der Dauer der Excursion, in erster Linie von der Größe ihres Abstandes von einander. Jene nächst gelegenen Punkte, von denen der erst bewegte gleich im Beginne seiner Bewegung sich entfernt, müssen natürlich gleich im Beginne nach einwärts gedrängt werden und in ähnliche transversale Schwingungen gerathen.

Da jede Verschiebung eines jeden Punktes für alle nächst angrenzenden einen Bewegungsimpuls abgibt, und zwar nicht bloß für die in Ruhe befindlichen, sondern auch für die bereits bewegten, so müssen alle Bewegungsbahnen nach jeder Zeiteinheit ihre im ersten Moment geradlinige Richtung mehr weniger ändern; je länger somit die Excursion des erst bewegten Theilchens dauert, oder je größer seine Anfangsgeschwindigkeit war, eine um so größere Anzahl neuer Massentheilchen muß während der Excursion verschoben werden und neue Bewegungsimpulse abgeben, mithin müssen auch sämmtliche Bahnen um so zusammengesetzter ausfallen; ihre ein-

©Akademie der Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

zelnen geradlinigen Elemente müssen um so größer sein, je größer die Verhältnißzahl zwischen der ursprünglichen Bewegungs- und der Fortpflanzungsgeschwindigkeit.

Der Unterschied, der für die Verschiebungen der einzelnen Punkte daraus erwächst, daß die erste Bewegungsrichtung eine verschiedene sein kann, besteht nur darin, daß bei jeder neuen Richtung die an den erst bewegten Punkt symmetrisch angrenzenden anderen in eine andere durch die Bewegungsrichtung zu legende Fläche fallen, während die in alle andern möglichen Flächen fallenden Punkte dann unsymmetrisch um die Bewegungsrichtung zu liegen kommen. Es resultirt daraus bloß der Unterschied, daß die Mittheilung des Bewegungsimpulses an die näher gelegenen Punkte intensiver ist, als an die ferneren. Denkt man sich statt eines Punktes mehrere, sei es in linearer, sei es in flächenhafter Ausdehnung in gleicher Richtung gleichzeitig in Bewegung gesetzt, und construirt in ähnlicher Weise die Verschiebungen der nächst gelegenen Punkte, so zeigt es sich, daß die Verschiebung nach den Seiten im ersten Moment nur an der Peripherie möglich ist, während im Inneren der Fläche alle Verschiebungen in der ersten Bewegungsrichtung erfolgen. Die Folge davon ist, daß die Annäherung der erst bewegten Theilchen an alle angrenzenden im ersten Moment viel bedeutender ist, als wenn die Verschiebungen auch nach den Seiten stattfinden können. Mit jeder neuen Zeiteinheit pflanzt sich aber das seitliche Ausweichen von der Peripherie nach einwärts fort, so daß die Bahnen aller Punkte allmählich aus der geradlinigen in die krummlinige übergehen. Die Ungleichheit der Verdichtung der Masse, die durch die überwiegende Annäherung der erst bewegten Massentheilchen an die in die Bewegungsrichtung fallenden zu Stande kam, gleicht sich durch allmäliges Ausweichen aller Bahnen nach den Seiten hin um so später aus, je größer die Fläche der zuerst bewegten Massentheilchen ist.

Wiederholen sich die Impulse, durch welche die erste Bewegung gesetzt wurde, in gleicher Richtung, wie das bei der transversalen Schwingung von Platten geschieht, so wird die Ausbreitung des ersten Impulses wohl unverändert vor sich gehen, aber die Wirkung desselben durch die nachfolgenden wesentlich modificirt werden, und zwar muß die Wirkung der Wiederholungen hauptsächlich davon abhängen, in welcher Zeit dieselben stattfinden.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Treten sie noch während der Vorwärtsbewegung der zuerst verschobenen Theilchen auf, so werden diese von ihnen gar nicht oder nur zum Theile getroffen, dagegen fallen die von den Seiten her an ihre Stelle gedrängten Theilchen mehr oder weniger in den Wirkungskreis des neuen Impulses; es muß mithin ihre Bewegungsrichtung, die ursprünglich mehr ein- und nur wenig auch aufwärts gerichtet war, überwiegend nach aufwärts gerichtet sein, so daß durch die Vermittlung der von den Seiten eingetretenen Theilchen der neue Impuls doch auch auf die erst bewegten übergeht und deren Geschwindigkeit vergrößert. Es hat mithin die Wiederholung des Impulses im Allgemeinen eine ähnliche Wirkung, als wäre der erste stärker gewesen. Durch das Eintreten der seitlichen Massentheilchen in den Wirkungskreis des ersten Impulses muß aber eine Verdichtung der Masse aufwärts vom Impulse sich ausbilden, durch die das Nachrücken der seitlichen Massentheilchen immer mehr verlangsamt wird. Diese Verdichtung wird bei gleicher Fortpflanzungs- und Bewegungsgeschwindigkeit ihr Maximum um so später erreichen, je weiter die ursprünglich ruhenden seitlichen Theilchen von einander abstehen d. i. je größer die Zahl der zuerst bewegten, oder in concreto je größer die Plattenfläche. Da mit dieser Verdichtung einerseits eine Verlangsamung der Vorwärtsbewegung und eventuell eine Beschleunigung der Rückwärtsbewegung erfolgt, so muß nach einer bestimmten Zeit die Geschwindigkeit des aufwärts gedrängten Lufttheilchens mit der der anregenden Schwingung zugleich erlöschen, und ersteres mit der Umkehr des letzteren auch abwärts gehen. In diesem Moment müssen auch die von den Seiten hergeschobenen Massentheilchen, deren Vorwärtsbewegung schon mit der Verdichtung der nach aufwärts gedrängten verlangsamt wurde, einen Impuls zurück nach außen erhalten, dem sie um so leichter folgen, je geringer bereits die Geschwindigkeit ihrer Vorwärtsbewegung in Folge der allmäligen Verdichtung, und je dünner die Masse nach außen geworden.

Unter der Voraussetzung, daß die Impulse der festen Platte die Druckkraft der verdichteten Lufttheilchen an Intensität weit übertreffen, werden die Schwingungen der letzteren nach abwärts nunmehr so lange isochron sein den ersteren, bis die Verdichtung in der nächsten Umgebung der Platte wieder so weit abgenommen hat, daß die durch ihren Impuls den Lufttheilchen nach aufwärts ertheilte

©Akademie der Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

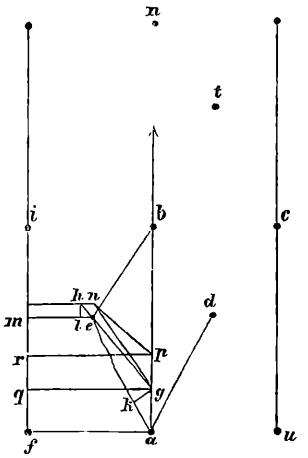
Geschwindigkeit nicht mehr in derselben Zeit auf 0 herabgedrückt wird, in der der Impuls nachläßt; je mehr die Verdichtung abnimmt, um so größer wieder die Divergenz der Schwingungsdauer der Luft- und der Plattentheilchen. Hingegen wird die Schwingungsdauer der nach außen zurückgedrängten seitlichen Lufttheilchen um so länger sein, je dünner hier die Luft geworden. Es werden mithin die verdichteten Lufttheilchen oberhalb der Platte bei jeder Excursion nach abwärts zugleich nach den Seiten ausweichen und in den verdünnten Raum übertreten, dadurch für die seitliche Masse immer neue Bewegungsimpulse nach außen abgeben, und zwar so lange, bis nach oben die Verdichtung so weit ab- und nach den Seiten zugenommen, daß beide im Gleichgewichte sind. Nach der obigen Auseinandersetzung hält aber jede Verdichtung in Folge von geradliniger Vorwärtsbewegung einer größeren Zahl von Massentheilchen um so länger an, je größer diese Zahl ist, weil das Ausweichen nach den Seiten um so mehr Zeit beansprucht.

Es wird mithin auch hier die Verdichtung oberhalb der Platte um so langsamer schwinden, je größer die Plattenfläche; ebenso wird die seitliche Verdünnung um so später in Verdichtung übergehen, je hochgradiger sie ist, also abermals je größer die Zahl der zuerst aufwärts bewegten Lufttheilchen oder je größer die Platte. Erst wenn die Verdichtung oberhalb der Platte vollständig geschwunden, seitwärts hingegen ihr Maximum erreicht hat, werden die seitlichen Theilchen abermals einwärts zurückkehren und sich neuerdings eine Verdichtung ausbilden.

Es entstehen mithin in diesem Falle außer den höchst mannigfachen durch die Plattenimpulse direct bedingten Schwingungsformen periodische Verdichtungs- und Verdünnungswellen, deren Dauer außer dem ersten Impuls noch von der Größe der Platte abhängt. Es bedarf keiner weiteren Auseinandersetzung, daß dieses Verhältniß unverändert bleibt, wenn der erste Impuls nicht im ganzen Umfange seines Wirkungskreises gleich stark ist, wenn z. B. wie bei Platten, die nur an einem Punkte einen Stoß erleiden, die Stärke des Impulses excentrisch immer schwächer wird. Analog wie die von festen Körpern verhalten sich auch die von begrenzten Lufträumen ausgehenden Impulse. Denkt man sich in Fig. 2 *fi* und *uc* entlang eine starre Wand, und *a* nach aufwärts geschoben, so können *e* und *d* nicht in dem Grade nach den Seiten ausweichen wie ohne

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Fig. 2.



die starre Wand, sondern sie weichen derart aus, daß ihre Entfernung von letzterer in demselben Verhältniß abnimmt, wie die von a. Ist a nach g gekommen, so hat es sich e um ak genähert, das Verhältniß $\frac{ak}{ae}$ gibt den Zuwachs an Druckkraft; würde e in der Richtung des Druckes proportional dem Elasticitätscoëfficienten und ak gegen h ausweichen, so müßte es sich der Wand z. B. um el nähern und $\frac{el}{em}$ wäre der Zuwachs an Druckkraft. Proportional dieser Druckkraft würde e während seiner Bewegung von der Wand zurückgedrängt, so daß nun zwei Impulse auf dasselbe einwirken, es mithin der Diagonale beider folgt und nach n gelangt. Die Bewegungsgeschwindigkeit wird nun offenbar um so kleiner, je stumpfer die Winkel, unter denen beide Componenten der Diagonale zusammenwirken. Nun wird aber dieser Winkel mit dem weiteren Vorrücken des a thatsächlich immer stumpfer, da Winkel egq spitzer ist als eaf und beim weiteren Vorrücken des a, etwa bis p, Winkel npr noch spitzer wäre, damit aber der Winkel der beiden Componenten in gleichem Grade stumpfer werden muß. Die Geschwindigkeit der Vorwärtsbewegung des e muß mithin immer kleiner, endlich O, und dadurch der Widerstand gegen das Vordringen und die Abnahme der Geschwindigkeit des a immer größer werden, und schließlich ein gewisses Maximum erreichen, so wie a in gleicher Höhe

©Akademie der Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

mit *e* steht. Hingegen muß *b*, da es sowohl von *e* als auch von *d* aus afficirt wird, fast mit der ganzen Anfangsgeschwindigkeit des *a* sich in Bewegung setzen.

Schon bei diesem einfachsten Falle ist zu ersehen, daß die Anfangsgeschwindigkeit des *b*, wenn es an der Grenze der starren Wand steht, ganz anders abnimmt, als innerhalb der Wände, da in letzterem Falle der Widerstand von *o* und *t* bedeutend größer ist, als im ersteren. Es verhält sich somit der Impuls, den das an der Grenze des geschlossenen Raumes stehende *b* empfängt, ganz analog den von festen Körpern ausgehenden Impulsen, es nimmt nämlich seine Anfangsgeschwindigkeit schneller ab, als die, des in den freien Raum hinaustretenden Theilchens, so daß auch hier von den Seiten her neue Massentheilchen an die Stelle des *b* treten müssen. Dieses Verhältniß bleibt selbstverständlich unverändert, wenn statt eines viele Massentheilchen gleichzeitig in gleicher Richtung sich bewegen; nur wird die Bewegung seitlicher Massentheilchen nach einwärts um so länger dauern, je größer der Querschnitt des Raumes, und wird hier die von den Seiten her eingeleitete Bewegung auch auf die im begrenzten Raume zurückwirken müssen. Es rücken nämlich die Theilchen aus dem Inneren des Raumes so lange gegen die offene Grenze vor, und überschreiten diese Grenze so lange, bis durch das seitliche Eindringen der Masse auch in der Nähe der oberen Grenze sich eine Verdichtung entwickelt, die jener gleich ist, durch welche die Theilchen aus dem Innern hinausgedrängt werden; erst wenn dieser Grad der Verdichtung erreicht ist, beginnt die retrograde Bewegung nach den Seiten und einwärts. Dieser Grad der Verdichtung wird aber caeteris paribus um so später erreicht, je größer der Querschnitt des begrenzten Raumes. Ist die obere Grenze des offenen Raumes auch theilweise geschlossen, so daß die Verdichtung im Inneren langsamer ab- und die von außen ebenfalls langsamer zunimmt, so muß dadurch abermals auch die Dauer der von den Seiten nach einwärts gerichteten Bewegung entsprechend verlängert werden, nur daß in diesem Falle die Dauer auf Kosten der Geschwindigkeit verlängert wird, während sie es im früheren Falle auf Kosten des zurückgelegten Weges war.

Ist auch die obere Grenze von einer starren Wand gebildet, so daß die abgeschlossene Luft mit der äußern nur an der Stelle, wo

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

der Impuls einwirkt, in Contact ist, so muß die Größe des Querschnittes im Verhältnisse zur Größe der Communicationsstelle ebenfalls bestimmend einwirken auf die Zeit, die das Maximum der Verdichtung erfordert, je größer nämlich der Querschnitt bei gleicher Communicationsstelle oder je kleiner die Communicationsstelle bei gleichem Querschnitte, um so später kann das Maximum der Verdichtung erreicht werden und umgekehrt. Die Schlüsse, die sich aus der ganzen Analyse ergeben, lassen sich in folgende Sätze zusammenfassen:

1. Bei jeder einseitig von einem verschieden dichten Medium begrenzten Luftmasse können Impulse, die von dieser Grenze in longitudinaler Richtung ausgehen, gleichzeitig auch transversal eine nahezu gleich starke Bewegung erzeugen, deren Periode von der Fläche, die der erste Impuls trifft, abhängt. Da in einem mehrseitig begrenzten Luftraume für Schwingungen eine andere Fortpflanzungsart besteht, als in der freien Luft, so verhält sich ein solcher Luftraum zur freien, wie ein verschieden dichtes Medium; indem jeder longitudinale Impuls auch eine transversale von der Größe der Berührungsfläche beider abhängige Bewegung erzeugt. Hierauf scheint die Vertiefung der Töne von Orgelpfeifen mit der Erweiterung ihres Lumens zu beruhen.

2. Die von einem verschieden dichten Medium an die freie Luft ertheilten Impulse werden in dieser nur dann selbstständige Schwingungsperioden erzeugen, wenn die Anfangsgeschwindigkeit der Luft größer ist als die Beschleunigung, die vom dichtern Körper an sie abgegeben werden könnte, so daß sie sich von ihm weiter entfernen muß, als in der Gleichgewichtslage. Dies ist aber in dem Grade mehr der Fall als die transversalen Schwingungsbahnen des dichteren Körpers sich der geradlinigen nähern, um so weniger, je langsamer die Schwingungsbahn das Maximum der transversalen Elongation erreicht. Hierauf scheint der Unterschied der Luftresonanz bei longitudinalem und transversalem Stoß, bei harten und weichen, dicken und dünnen Körpern sich zu beziehen.

3. Die Bewegung eines jeden Punktes im Innern einer schwingenden Masse ist als aus einer Summe von Einzelimpulsen zusammengesetzt zu betrachten. Die Größe der Summe hängt von der Ausdehnung und Dichte der bewegten Masse, die Geschwindigkeit der Bewegungen von der Stärke des ersten Impulses ab. Je rascher die Impulse auf ein-

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

ander folgen, um so gleichmäßiger gekrümmt muß die Schwingungsbahn sein; je langsamer, aus um so größeren geradlinigen Elementen muß die Bahn bestehen. Da die subjective Schallempfindung bei gleich starker erregender Kraft um so intensiver wird, je größer die afficirte Masse innerhalb einer gewissen Grenze, und durch die Vergrößerung der Masse nur die Zahl der Impulse, nicht aber die Summe der bewegenden Kräfte vermehrt wird, so liegt der Schluß nahe, daß die subjective Schallintensität nicht bloß von der Größe der Amplitude, sondern auch von ihrer Form wesentlich abhänge.